



# 行星滚柱丝杠——高精技术集成之作， 人形机器人线性关节

投资评级：推荐（维持）

报告日期：2024年03月28日

- 分析师：林子健
- SAC编号：S1050523090001

研究创造价值

## ◆ 行星滚柱丝杠是人形机器人优质细分赛道

以特斯拉Optimus为例，单台人形机器人需要14个行星滚柱丝杠，单价约2,000元/个，单台价值量在2.8万元以上。横向对比机器人其他部件，行星滚柱丝杠占人形机器人价值量较高，其毛利率可达60%，盈利能力位居前列。

## ◆ 滚柱丝杠壁垒高，国产替代前景广阔

滚柱丝杠技术壁垒和价值量高，应用空间增量前景广阔，但国产化率低。相较于滚珠丝杠，滚柱丝杠具备载荷大、精度高、体积小、使用寿命长等特点，更适配于人形机器人领域。由于滚柱丝杠加工流程长、制造壁垒高，相应价值量较高。**未来随着冷锻等工艺趋于成熟，行星滚柱丝杠制造成本有进一步下探空间。**国内行星滚柱丝杠市场集中度较高，目前外国企业占据8成市场份额，**而国内南京工艺等国内企业产品性能与外国产品差距较小，国产替代前景广阔。**

## ◆ 乘人形机器人东风，市场空间快速放量

**机器人的复杂性和功能乃至能力取决于其总自由度的数量以及自由度的配置和控制方式。**随着机器人的复杂性和功能性增加，人形机器人自由度数量也将持续上升，**人形机器人自由度上限可参考人体上限可参考人体有数百个自由度，而丝杠是实现人形机器人的线性关节，是实现人形机器人自由度的关键部件。**从未来市场空间来看，2030年人形机器人出货量有望达205.0万台，对应2870.3亿元的市场空间，到2030年，应用于人形机器人的行星滚柱丝杠价值量为229.6亿元，CAGR为154.1%。

## ◆ 推荐逻辑和相关标的

伴随着将来人形机器人产品趋于成熟，叠加端到端AI大模型赋能，功能性、实用性兼顾，人形机器人将成为“继计算机、智能手机、新能源汽车后的颠覆性产品”，**行星滚柱丝杠作为“执行侧”的关键部件，凭借“高技术壁垒&国产替代趋势显著&清晰降本路径”将成为人形机器人赛道的重要细分投资赛道。**1) **新剑传动**：公司已建成国内首条行星滚柱丝杠产线，产品已应用于人形机器人，汽车领域客户包括吉利、理想、华为等头部车企，机器人合作伙伴包括小米、小鹏、智元、科沃斯机器人等；2) **鼎智科技**：公司线性执行器产品市占率全球第二，通过滚压工艺生产T型丝杠；3) **贝斯特**：通过子公司宇华精机布局丝杠业务，2023年上半年公司高精度滚珠丝杠产品已送样至战略客户处进行验证；4) **秦川机床**：子公司汉江机床掌握螺纹铸造核心技术，丝杠产品精度最高可达P0级，目前2级、3级精度的滚珠丝杠已实现量产，同时公司具备螺纹磨床的生产能力。

公司代码	名称	2024-03-28 股价	EPS			PE			投资评级
			2022	2023E	2024E	2022	2023E	2024E	
000837.SZ	秦川机床	9.16	0.31	0.22	0.31	29.95	41.64	29.38	未评级
300580.SZ	贝斯特	26.07	1.14	0.80	0.97	22.87	32.59	26.88	买入
873593.BJ	鼎智科技	36.07	3.05	0.89	1.18	11.83	40.53	30.64	未评级

注：鼎智科技已发布2023年年报，所以2023年EPS和PE是实际值而非预测。

资料来源：wind，华鑫证券研究（未评级公司盈利预测取自wind一致预期）

## 机器人市场风险

机器人量产进度不及预期

## 原材料价格风险

丝杠原材料多采用高碳铬轴承钢，原材料价格上升会导致丝杠成本上升

## 投产进度不及预期

各个公司丝杠产能布局投产进度可能不及预期

## 地缘政治风险

丝杠属于高精密产品，生产设备需要高精度螺纹磨床，国内螺纹磨床的进口可能受到外国政策限制

## 推荐公司业绩不及预期

# 目录

## CONTENTS

- 1、线性传动核心部件，高精技术集成之作
- 2、行星滚柱丝杠精度要求高，加工工艺壁垒深厚
- 3、人形机器人关节核心部件，国产替代前景广阔
- 4、国内企业纷纷布局，丝杠产能迎来爆发期

# 01

线性传动核心部件，高精技术集成之作

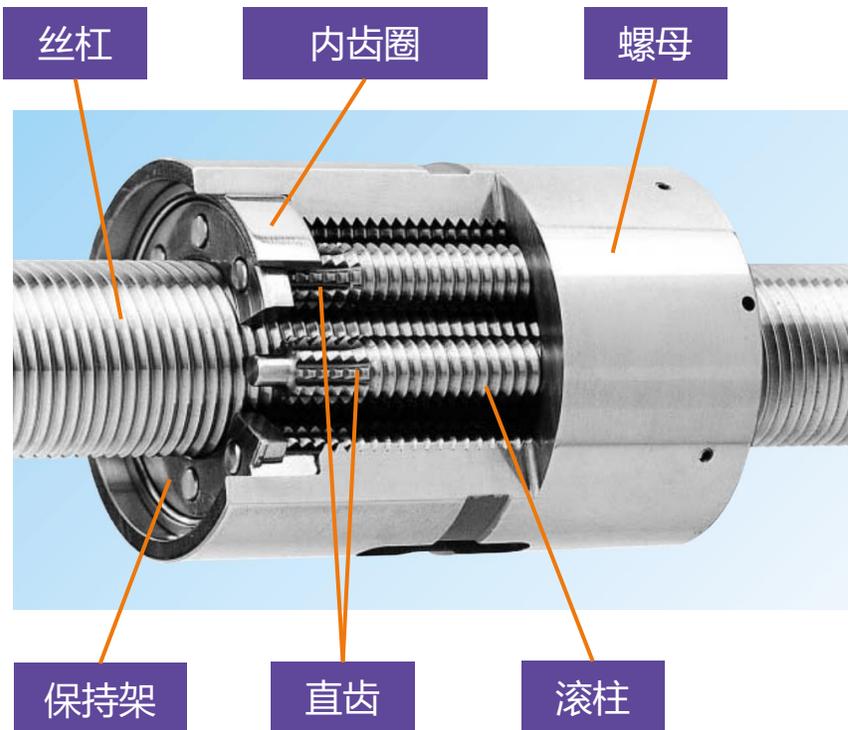
研究创造价值

# 1、线性传动核心部件，高精技术集成之作

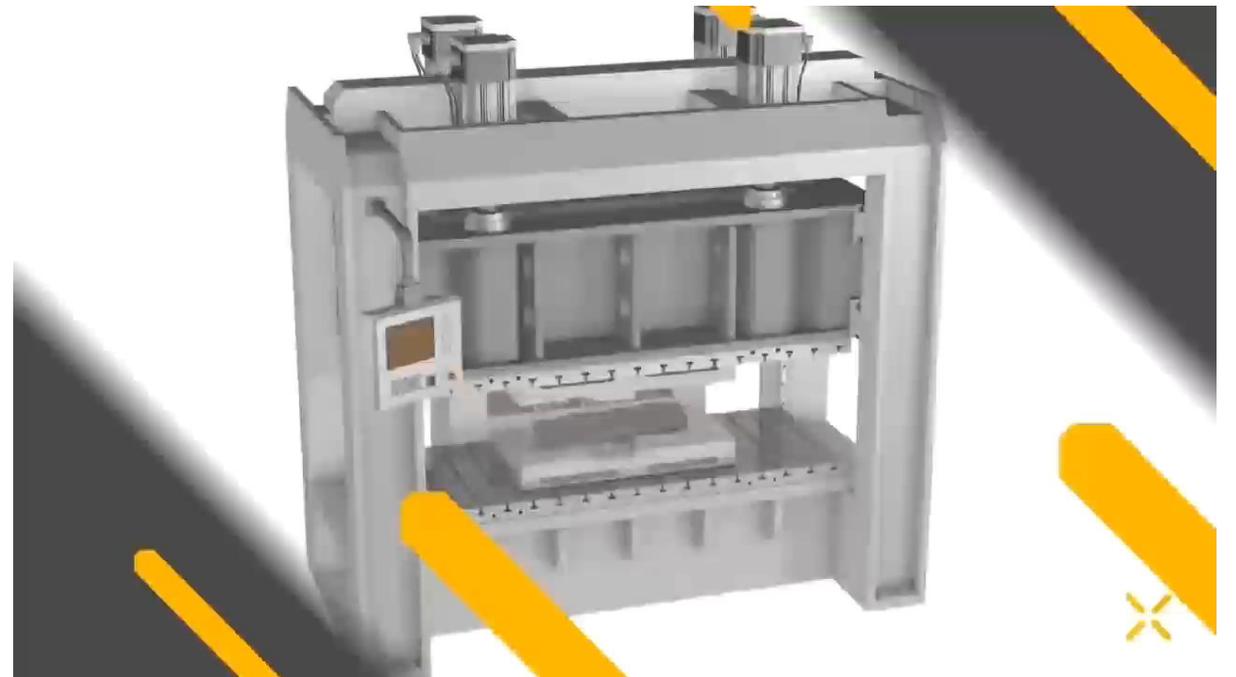
## 1.1、行星滚柱丝杠介绍

行星滚柱丝杠(PRSM)是一种可将旋转运动和直线运动相互转化的机械传动装置，具有螺纹传动和滚动螺旋传动的综合特征。与滚珠丝杠传动相比，其滚动体不是多个球体，而是含有螺纹的多个滚柱体。螺母或丝杠旋转运动通过滚柱的行星运动转换为直线运动。行星滚柱丝杠传动中特有的滚柱结构，使得滚柱与螺母(或滚柱与丝杠)之间无相对轴向位移，滚柱能够在丝杠和螺母形成的封闭空间内反复循环运动，依靠滚动/滑动摩擦实现运动和动力的传递。

标准式行星滚柱丝杠传动机构的结构形式



滚柱丝杠运动形式



资料来源：SKF, Ewellix, 柯浩《行星滚柱丝杠传动精度分析与设计》，华鑫证券研究

# 1、线性传动核心部件，高精技术集成之作

## 1.1、行星滚柱丝杠介绍

**导程是丝杠旋转前进中螺母运动的距离。** PRS主要组成元件有：丝杠1，其螺纹牙型是直角的三角形螺纹（至少是3线螺纹）；螺母7，其内螺纹牙型与丝杠相同；滚柱5，其螺纹牙型是直角的圆弧螺纹（单线螺纹），在每个滚柱的末端都有一个圆柱形的枢轴和齿轮。枢轴安装在挡板2的圆孔内，这确保了滚柱的径向均匀分布。轮齿与内齿圈4啮合，这使得滚柱轴向平稳地运行。挡圈3，用来锁紧挡板。平键6，用于联接所传动的物体，其结构简单，拆装方便，对冲性好，适合高速、承受变载、冲击的场合。

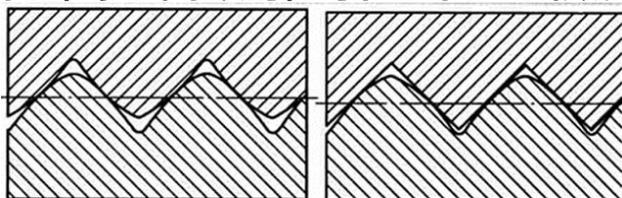
**螺纹线数：**沿一条螺旋线形成的螺纹称为单线螺纹，沿轴向等距分布的两条或两条以上的螺旋线形成的螺纹称为多线螺纹。

**螺距 (p)** 是相邻两牙在中径线上对应两点间的轴向距离。

**导程 (ph)** 是同一条螺旋线上的相邻两牙在中径线上对应两点间的轴向距离。

**单线螺纹时，导程=螺距；多线螺纹时，导程=螺距×线数。**

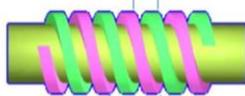
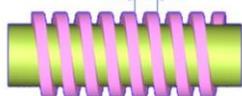
### 丝杠和滚柱牙型



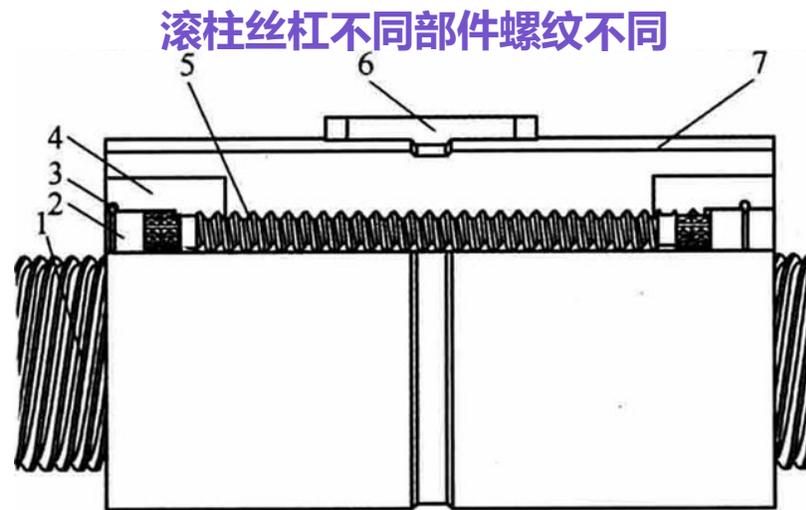
a) 两边弧形  
导程=螺距

b) 单边弧形  
螺距

### 单线螺纹和 双线螺纹 导程区别

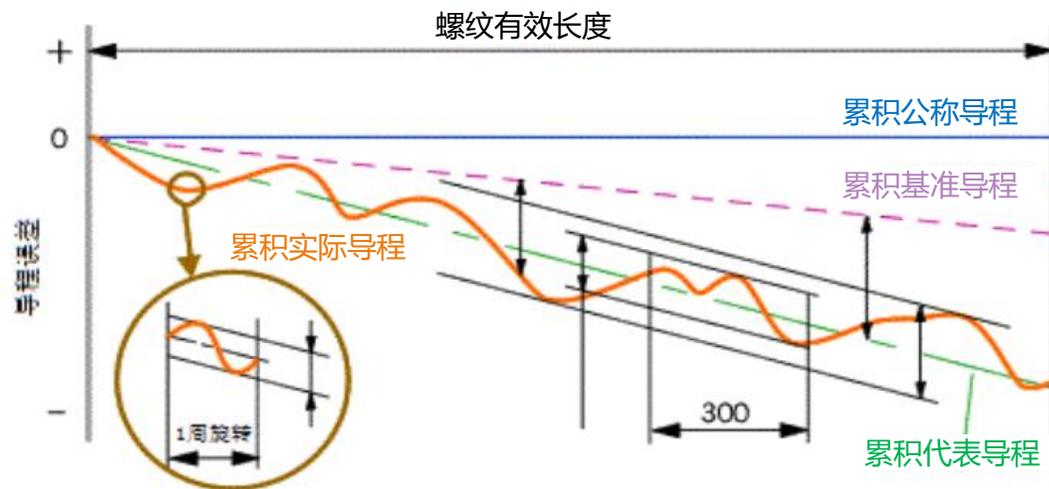


导程



滚柱丝杠不同部件螺纹不同

### 丝杠导程



资料来源：冯虎田《滚珠丝杠副动力学设计与基础》，米思米中国，《机械篇 | 说说滚珠丝杠的那些事》华鑫证券研究

# 1、线性传动核心部件，高精技术集成之作

## 1.2、导程精度是PRS的关键指标

导程精度是划分等级的核心指标，C0精度等级最高。在传动中，实际移动距离和理想移动距离的偏差，其中有分为三种情况：1) 旋转一周的运行精度；2) 整根丝杠的运行精度；3) 任意300mm的运行精度。一般情况下导程精度是指运行300mm的精度。

一般来说，普通机械采用C10-C7级，数控设备一般采用C5-C3级。航空制造设备，精密投影及三坐标测量设备等一般采用C3、C2精度。另外，C10-C7级一般采用轧制方法制造，C5级及以上采用磨削方法制造。

### 不同用途丝杠精度需求

### 丝杠性能指标说明

性能指标	说明
丝杠轴径	常见的规格有：8、10、12、14、15、20、25、32（单位：mm）。一般是轴径越大，负载越大。
静/动额定负荷	静额定负荷指的是在静止状态下，丝杠可以承受的额定负荷。一般我们只关心动额定负荷就可以。实际负载和额定负荷的比值越小，丝杠的理论寿命越长。
导程	导程指的是丝杠旋转一周，螺母直线运动的距离。常见的导程有（单位：mm）：2、4、5、8、10、20、25、32。
精度	按国内分类，精度等级有P1、P2、P3、P4、P5、P7、P10，日本、韩国，还有中国台湾省采用JIS等级，即C0、C1、C2、C3、C5、C7、C10；欧洲国家的标准采用的是IT0，IT1，IT2，IT3，IT4，IT5，IT7，IT10。

用途	C0	C1	C3	C5	C7	C10
机床	○	○	○	○		
加工中心		○	○	○		
铣床		○	○	○		
钻床			○	○	○	
坐标镗床	○	○				
磨床	○	○	○			
放电加工机		○	○			
射出成形机				○	○	
钢铁设备机械				○	○	
冲床			○	○		
激光加工机			○	○		
通用机械、专用机械			○	○	○	○
木工机				○	○	○
化学处理装置			○	○		
电子部件实装机		○	○	○		
焊线机		○	○	○		
探测器	○	○				
印刷基板开孔机		○	○	○		
直交座标型机器人			○	○		
垂直多关节型机器人			○	○		
三元测定机	○	○	○		○	
图像处理装置	○	○	○			
原子能控制棒			○	○	○	
航空器			○	○	○	

### 丝杠精度标准

精度等级	C0	C1	C2	C3	C5	C7	C10
精度 (E300)(μm)	3.5	5	7	8	18	50	210

资料来源：中捷众创公众号，椿中岛《直线运动产品综合样本》，华鑫证券研究

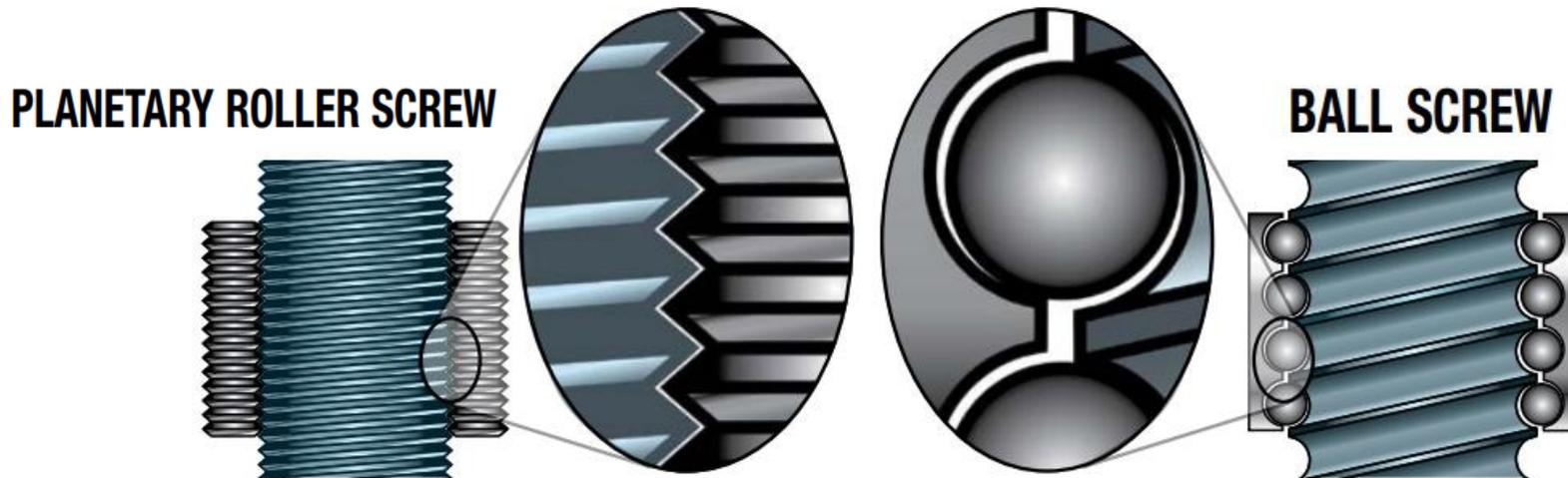
# 1、线性传动核心部件，高精技术集成之作

## 1.3、滚柱丝杠和滚珠丝杠比较优势在于精度、载荷、寿命等多方面

滚珠丝杠螺母组件包含多个滚珠轴承，能够处理中等负载的滚珠轴承有最小尺寸要求。与相似尺寸和导程的滚柱丝杠相比，滚珠轴承的半径需要更粗糙的螺距，导致接触点更少。加上较小的接触半径和允许轴承互相接触的设计，限制了滚珠丝杠的DLR (Dynamic Load Rating)，导致较低的力和较短的使用寿命。相比于传统的滚珠丝杠传动，行星滚柱丝杠传动呈现**多副(螺纹副和齿轮副)、多体(多个零件参与啮合传递运动和动力)、多点(螺纹副多点接触)**的啮合特征，故在相同丝杠直径下，**行星滚柱丝杠比滚珠丝杠的承载能力提高6倍，相同负载下节省1/3空间，寿命提高14倍，工作环境温度范围提高2倍。**

在实际应用中，滚柱相对于螺母无轴向运动，丝杠转速可达6000r/min，螺母直线速度可达2m/s。采用行星滚柱丝杠作为传动机构的EMA与采用滚珠丝杠的EMA相比**相同推力下重量减少30%，相同重量下推力提升50%**。而且，行星滚柱丝杠可采用微小导程(螺距可达0.3mm)，不仅更便于控制传动精度和提升动态频响，而且由于更多接触点同时参与传力，能够实现重载条件下的超高精密传动。

行星滚柱丝杠与滚柱丝杠性能对比

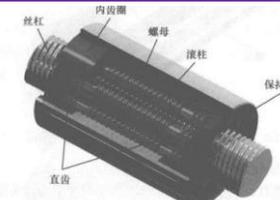
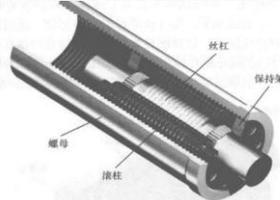
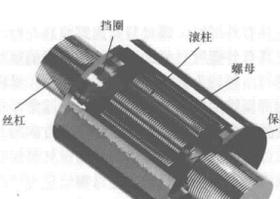
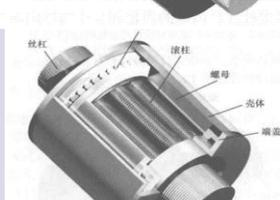
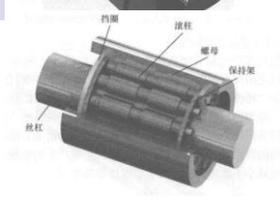


性能	滚柱丝杠	滚珠丝杠
动态额定载荷	非常高	中等
寿命	很长，几倍于滚珠丝杠	一般
冲击载荷	非常高	中等
相对体积	最小	中等
加速度	高	中等
精度	高	一般

资料来源：TOLOMATIC，华鑫证券研究

# 1、线性传动核心部件，高精技术集成之作

## 1.4、不同类别行星滚柱丝杠运动方式和应用场景不同

类别	运作方式	结构特点	性能特点	应用场景	图示
<b>标准式行星滚柱丝杠</b>	丝杠为主动件，螺母为输出构件。当丝杠旋转时，滚柱通过与丝杠之间的螺纹啮合一方面会沿着丝杠轴线方向作直线运动，另一方面会在丝杠、螺母之间作行星运动，	丝杠和螺母为多头螺纹，牙型均为三角形。滚柱为单头螺纹，牙型为球形轮廓。滚柱两端加工有直齿，与安装于螺母内的内齿圈啮合，以确保滚柱轴线平行于丝杠轴线而正常滚动。	能够实现较大行程。	适用于环境恶劣、高负载、高速等场合，是目前应用最广泛的类型。主要应用轧钢、切削运动等。	
<b>反向式行星滚柱丝杠</b>	反向式行星滚柱丝杠传动与标准式工作原理一样。与标准式行星滚柱丝杠不同的是，反向式行星滚柱丝杠将螺母作为主动件，由丝杠直线输出，滚柱与丝杠之间没有相对轴向位移。因此，滚柱螺纹和丝杠螺纹长度一致。	没有内齿圈。在丝杠螺纹两端加工有外直齿，即由标准式滚柱直齿与内齿圈的内啮合变为丝杠直齿与滚柱直齿的外啮合。	行程受到螺母内螺纹长度的限制。	用于中小负载、小行程和高速的应用场景。如航空、航天、船舶、电力等领域。	
<b>循环式行星滚柱丝杠</b>	滚柱在完成一个循环后进行位置重置，即回到初始位置重新与丝杠啮合，同滚珠丝杠传动的返回器功能相似。螺母沿径向加工有一个凹槽，滚柱每完成一个循环后在凸轮环作用下将滚柱挡入凹槽，与丝杠螺纹脱离啮合回到起始位置。	去掉了内齿圈，增加了一个带有凸轮的挡圈。滚柱结构形式不是单头螺纹，而是无螺旋升角的“环槽”状，并沿轴线圆周排。	可采用更小的螺纹导程，位置精度高，啮合点更多，承载力更大，但摩擦也会增强。	应用于要求高刚度、高精度的场合，医疗器械、印刷机械、光学精密仪器等领域。	
<b>轴承环式行星滚柱丝杠</b>	滚柱和螺母之间没有轴向位移，动力由丝杠传给滚柱，再由滚柱传给两端的推力圆柱滚子轴承，螺母可自由旋转并将动力传给推力圆柱滚子轴承，最后由推力圆柱滚子轴承传到壳体上。	丝杠是多头螺纹，滚柱与循环式行星滚柱丝杠的滚柱相似，同为无螺旋升角的“环槽”结构，但螺母不是单个部件，而是由推力圆柱滚子轴承和壳体组成。	轴承环的旋转将摩擦力沿圆周方向分散，摩擦力小，传动效率高。	适用于较大轴向负载、高轴向刚度、高效率等场合，如石油化工、重型机械等领域。	
<b>差动式行星滚柱丝杠</b>	螺母、滚柱和丝杠螺距相等，滚柱与螺母相对轴向位移为零，端部保持架用于支撑多个滚柱。丝杠做正传动运动，即将丝杠的螺旋运动转换为螺母沿轴向方向的直线运动。	省去内齿圈，多了端部保持架和挡圈等。差动式行星滚柱丝杠的滚柱螺纹分为两段，可在螺纹啮合的两端形成稳定支撑，从而防止倾斜。	承载能力强、刚度大、磨损小和寿命长，具有更大的传动比。	适用于承载能力较高的应用场合。	

资料来源：刘更《行星滚柱丝杠传动啮合原理》，华鑫证券研究

# 1、线性传动核心部件，高精技术集成之作

## 1.5、行星滚柱丝杠在军工和民用均有大量应用场景

国外行星滚柱丝杠产品已经在军工装备、汽车自动化产线、大型机床、电动执行器等产品领域获得规模商业化应用。在民用领域，行星滚柱丝杠与电机一体化形成电动执行器，国外已经在阀门执行器、塑料机械、无人汽车、六自由度模拟器、高端汽车生产线等领域得到应用。行星滚柱丝杠在国外军品应用案例包括 F-35B 战斗机电动起落架、潜艇自由度模拟仿真平台、电动造波机、美国鱼鹰战斗机航空武器悬挂发射系统装置、美国武装直升机的航空武器悬挂发射系统装置和螺旋桨高低调节装置等。

行星滚柱丝杠属于精密传动零部件，国内目前行星滚柱丝杠加工制造设备主要有采用滚珠丝杠制造设备或者研发专用制造设备，加工精度基本可以达到 G5 级精度。国内行星滚柱丝杠厂商受加工设备、加工工艺、材料和热处理工艺、测试设备、产业工人等因素的制约导致产品无法实现规模化地商业推广和应用。在替代国外进口产品以及未来全电动装备发展中，行星滚柱丝杠存在着巨大的市场应用前景。

### 滚柱丝杠有非常广泛的应用场景

- 行业**
- 航天航空
  - 石油行业
  - 半导体
  - 军工
  - 核工业
  - 生物化学工业
  - 汽车制造业
  - .....

- 设备**
- 光学仪器
  - 连铸机
  - 医疗器械
  - 望远镜
  - 阀门控制
  - 测量仪器
  - 印刷
  - 机床
  - 激光设备
  - 压力机
  - 电动缸
  - .....

### 滚柱丝杠在典型行业应用

典型行业	应用细分	客户的技术需求	滚柱丝杠匹配性
医疗器械	CT、MRI	安全性高、设计紧凑	高功率密度
	放疗设备	精度高、刚性高	高精度、高刚性
自动化设备	金属成型机	承载能力强、设计紧凑	高功率密度
	精密机床	使用寿命长	使用寿命长
	娱乐模拟器	精度高、刚性高	高精度、高刚性
	伺服压力机、注塑机	速度和加速度高	高速、高加速性能
汽车生产线技术	自冲铆、涂胶	轻量化	高功率密度
	伺服点焊设备	定位精度高 寿命长、可靠性强	高传动精度 极强的可靠性

资料来源：rollivs产品手册，华鑫证券研究

资料来源：王有雪《E公司滚柱丝杠产品营销策略研究》，华鑫证券研究

## 02

行星滚柱丝杠精度要求高，加工工艺壁垒深厚

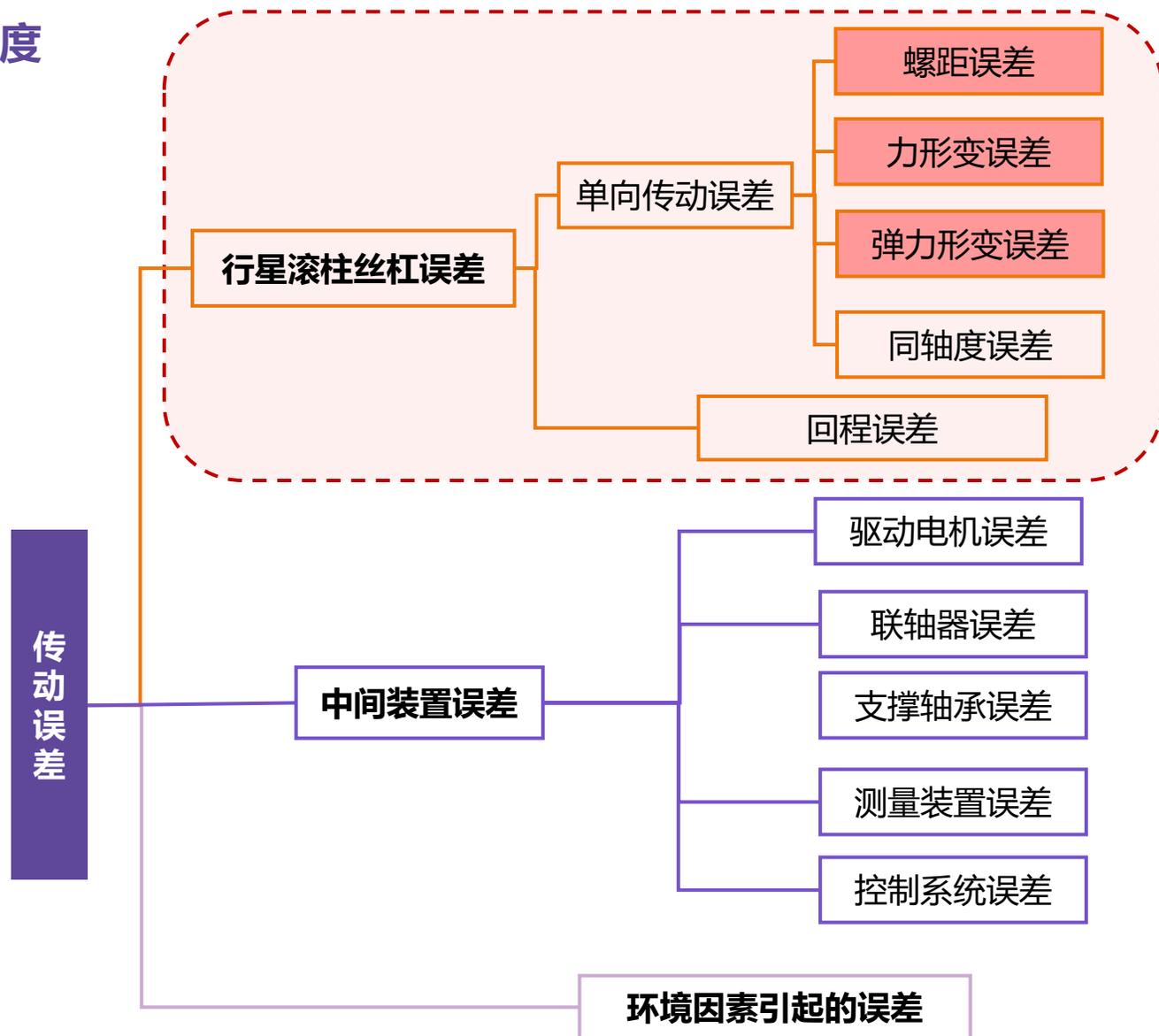
研究创造价值

## 2、行星滚柱丝杠精度要求高，加工工艺壁垒深厚

### 2.1、滚柱丝杠加工的核心在于减小误差、提高精度

PRS在实际运用过程的传动误差主要包括PRS自身误差、中间装置误差和环境因素引起的误差等。PRS传动误差是指螺母实际位移与理论位移之差。由于PRS传动机构是驱动电机、联轴器、支撑轴承、行星滚柱丝杠、测量装置、控制系统等部件一体化集成设计的复杂的机电设备，因此影响传动精度的误差来源众多，且性质和规律各不相同。PRS传动误差可由丝杠、滚柱和螺母引起的误差进行叠加，但在工程实际中，不能进行简单线性叠加。

- **螺距误差**：属于系统误差且为某一固定值。
- **力形变误差和弹性接触形变误差**：在轴向载荷和扭转力矩作用下，丝杠会发生力形变，形变量与丝杠的支撑方式和有效长度有关。
- **同轴度误差**：PRS在加工制造过程中，螺纹制造误差造成螺纹与轴颈部的同轴度误差，进而引起传动误差。
- **安装误差**：与滚珠丝杠类似，PRS自身径向跳动和轴向窜动也会影响到传动精度。可通过设计预紧螺母等硬件调校机构以减少影响。
- **回程误差**：指输入轴正向、反向运动一次，实际与理论行程之间的偏差，反映丝杠、滚柱和螺母的螺纹间隙对传动精度的影响。



资料来源：精密行星滚柱丝杠的传动特性 李凯，华鑫证券研究

## 2、行星滚柱丝杠精度要求高，加工工艺壁垒深厚

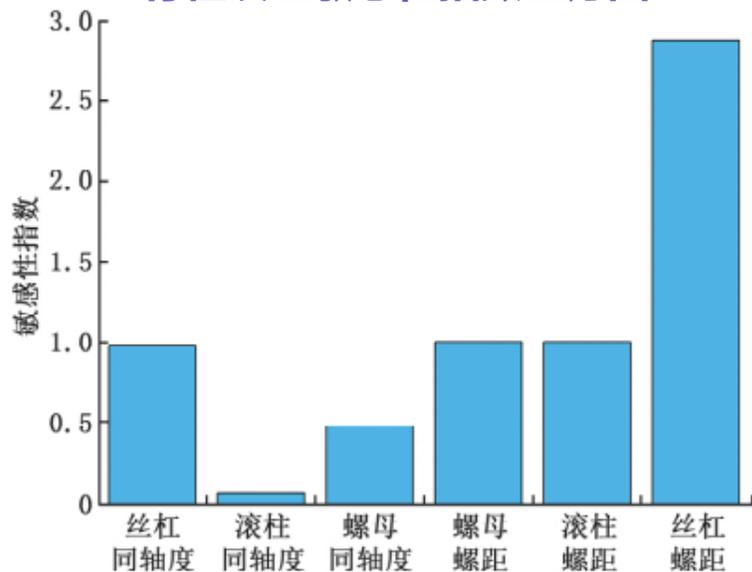
### 2.1、丝杠螺距误差是产生误差最主要因素

在实际生产加工过程中，螺距误差对啮合干涉或啮合间隙影响明显。精密传动行程精度的影响误差大致分为三类：周期性系统误差、随机误差、非周期性系统误差。PRS的行程精度的周期性误差主要由丝杠、滚柱、螺母螺纹同轴度原始误差引起；而非周期性误差则由丝杠、滚柱、螺母中径误差及螺距误差引起；随机误差是温度、湿度、环境因素引起。

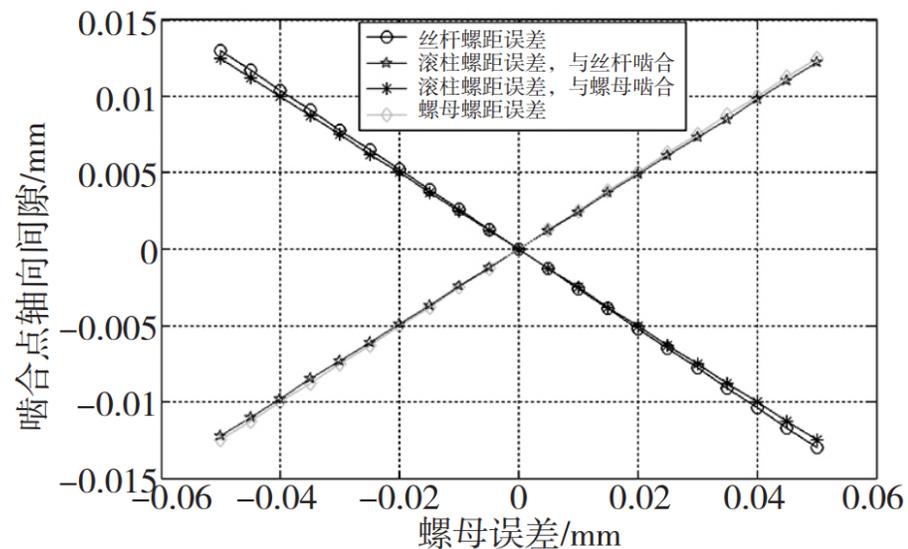
所有误差因素与行程误差均为正相关，其敏感性指数从大到小依次为：丝杠螺距 (2.8570)、滚柱螺距 (1.0000)、螺母螺距 (1.0000)、丝杠螺纹同轴度 (0.9800)、螺母螺纹同轴度 (0.4750)、滚柱螺纹同轴度 (0.0585)，滚柱同轴度敏感性指数小于0.1，可以忽略不计。

中径误差对行程精度无直接影响，但对轴向间隙有显著影响。相关敏感性指数从大到小依次为：滚柱中径误差 (-4)、丝杠中径误差 (-2)、螺母中径误差 (2)。丝杠、滚柱、螺母中径误差与啮合间隙量在同一数量级上，对啮合点轴向间隙量的影响最大，螺距误差次之，误差会导致啮合干涉或间隙量过大。

行程误差敏感性指数直方图



啮合间隙量与滚柱、螺母、丝杆螺距误差成线性关系



资料来源：吴翰林《基于加工误差敏感度与模糊层次分析法的行星滚柱丝杠公差匹配优化方法》，华鑫证券研究

## 2、行星滚柱丝杠精度要求高，加工工艺壁垒深厚

### 2.2、螺纹加工工艺是丝杠加工的核心壁垒

行星滚柱丝杠的材料选取决定结构刚度，直接影响形变误差。提高结构的刚度和强度，最有效的途径是选择弹性模量和强度高的材料。材料在行星滚柱丝杠设计具有很重要的作用。

行星滚柱丝杠中丝杠选用的材料为合金结构钢42CrMo，合金结构钢42CrMo强度和淬透性比35CrMo有所增高，调质后有较高的疲劳极限和抗多次冲击能力，低温冲击韧性良好。对合金结构钢42CrMo需做预处理，表硬度不低于54~60HRC。螺母和滚柱选用的材料为高碳铬轴承钢GCr15，其综合性能良好，火和回火后具有高而均匀的硬度，良好的耐磨性和高的接触疲劳寿命，热加工变形性能和切削加工性能均好。对高碳铬轴承钢 GCr15 需做进行淬火处理，其表面接触硬度为56~60HRC。

滚柱的滚动表面与丝杠的两个接触螺纹槽表面是容易产生疲劳点蚀。丝杠和螺母的螺旋槽的表面及滚柱的滚动表面进行渗碳或碳氮共渗处理，可以生成硬化的表层，以延长使用寿命，提高承载能力。

#### 丝杠材料选择

#### GCr15报价在5000元/吨以上



资料来源：我的钢铁，冯虎田《滚珠丝杠副动力学设计与基础》，华鑫证券研究

	应用范围	材料	热处理	HRC
丝杠	$l \leq 1m$	20CrMoA	渗碳、淬火	
	$1 \leq 2.5m$	42CrMoA、55Mn、50Mn、60Mn	高、中频淬火	60±2
	$l > 2.5m$	38CrMoAlA	氮化	850HV
	$d > 40mm$	GCr15SiMn	整淬	60+2
	$d \leq 40mm$ $l \leq 2m$	GCr15	整淬	
	$d \leq 40mm$	GCr15		60+2
	$d = 40-80mm$ $l \leq 2m$	CrWMn	整淬	
	有防腐要求者	9Cr18	中频淬火	56
螺母		GCr15、CrWMn、9Cr18	淬火回火	
		18CrMnTi、12CrNiA、12Cr2Ni4A	渗碳、淬火	60+2

## 2、行星滚柱丝杠精度要求高，加工工艺壁垒深厚

### 2.2、螺纹加工工艺是丝杠加工的核心壁垒

**磨削精度高，滚扎效率高，硬旋铣较均衡。**行星滚柱丝杠依靠零件间的螺纹啮合实现传动功能，螺纹的加工精度将直接影响系统的传动精度、使用寿命、与平稳性，故优化螺纹的加工技术是提升PRS整体性能的关键。PRS 螺纹制造工艺方法主要为成型加工，例如目前应用于丝杠副螺纹制造技术主要有磨削技术、滚轧成型和旋风铣削技术三种。

#### 三种螺纹加工工艺对比

工艺项目	磨削	滚轧成型	旋风硬旋铣
对材料要求	无特殊要求	对精胚外圆尺寸、公差、圆度、圆柱度、直线度要求严格,材料塑性应变能力、延伸率要求较高	对精胚外圆的圆度、圆柱度、直度及硬化层深度,硬度的均匀性有要求
最高加工精度	P3级,P1级,PO级	P3、P5导程误差的波动小、线性好	P3级导程误差的波动小、线性好
齿形精度及表面质量	砂轮品质和使用寿命对其有直接影响	Ra=0.5-0.8um,表面光滑、处于压应力状态	Ra=0.4um,高速、渐近、低温切削,表面质量优于磨削
适宜加工对象	常用规格高精度丝杠螺纹的精加工	超细长、大导程、超大导程双头和多头螺纹	整体大型超长丝杠,大钢球重型BS,各类异型螺杆
资源友好性	湿切削,能耗、油耗、水耗均较高	低耗无屑加工、材料利用率高达80%以上	干切削,省工序,能耗、油耗、水耗低于磨削
环境友好性	有磨粒金属粉尘、油雾	无油雾和粉尘,污染小	噪声小,无油、少屑,污染小
生产效率与制造周期	效率低、工序多、制造周期最长	单机快速产出,库存性供货	生产效率高于磨削低于冷滚轧
装备及制造成本	螺纹磨床已国产化,生产工序多、制造成本高	关键设备前期投入大,后期成本取决于轧辊寿命、研发制造能力	关键设备前期投入大,后期成本取决于PCBN刀片寿命及刃磨的自主化能力
量产	更换工件规格较容易,不受生产批量限制	标准化,系列化大批量生产	调整对刀比较麻烦,适用一定批量的产品

资料来源：王伟《大型螺纹旋风硬铣削数值模拟及工艺参数优化》，华鑫证券研究

## 2、行星滚柱丝杠精度要求高，加工工艺壁垒深厚

### 2.2.1、磨削精度高，生产效率低

越精密、硬度越高的丝杠的工艺要求高、工序步骤多、加工时间长。

1) 精密级及普通级两类丝杠由于材料的不同，其毛坯的热处理方式也就不同。毛坯热处理是预备性热处理，可以消除毛坯制造带来的内应力，并且能控制硬度以适应机械加工的切削性能。碳素钢球化退火后金相组织稳定，残余应力被消除，具备很好的加工性；

2) 机械加工的时效处理工序不同。丝杠精度不同则时效处理次数不同，**一般来说，精度要求越高，时效处理次数越多。**

**此外，硬度要求高的丝杠（HRC56以上）必须进行淬火处理**，淬火可以有效地保证丝杠的机械性能、硬度和稳定性。淬火工艺的丝杠需要多次回火以及冰冷处理以消除应力。

#### 精密丝杠和普通丝杠磨削加工工艺对比

	毛坯	粗加工	半精加工	精加工	
<b>精密丝杠</b>	下料 金相检查 球化退火 (弯曲≤5mm)	切端面，用调心套打中心孔 粗车两端及外圆 高温时效 (t=500~550°C, 10小时) (径向跳动≤1.5mm)	切两端面，重打中心孔 半精车外圆 粗车螺纹(螺纹槽宽4mm, 深8.5mm) 高温时效(t=500~550°C, 10小时) (径向跳动≤1mm)	切两端，重打中心孔 再半精车外圆 再粗车螺纹(螺纹槽宽5mm, 深7.5mm) 低温时效 (t=160°C±10°C, 36时) (径向跳动≤0.5mm)	切端面，重打中心孔 粗磨外圆 半精车螺纹(车成15°牙形) 低温时效(t=160°C±10°C, 36小时) (径向跳动≤0.25 mm)
<b>普通丝杠</b>	下料 校直正火 (弯曲≤2mm)	切端面，打中心孔 粗车两端及外圆校直 高温回火 (径向跳动≤1mm)	打中心孔，齐总长 半精车两端及外圆 粗车螺纹校直 低温时效 径向跳动≤0.2mm)	粗磨外圆 半精车螺纹 低温时效 (径向跳动≤0.5mm)	修研中心孔 精磨外圆及两段 精车螺纹至图纸尺寸

资料来源：《轴、箱体、丝杠加工》，华鑫证券研究

## 2、行星滚柱丝杠精度要求高，加工工艺壁垒深厚

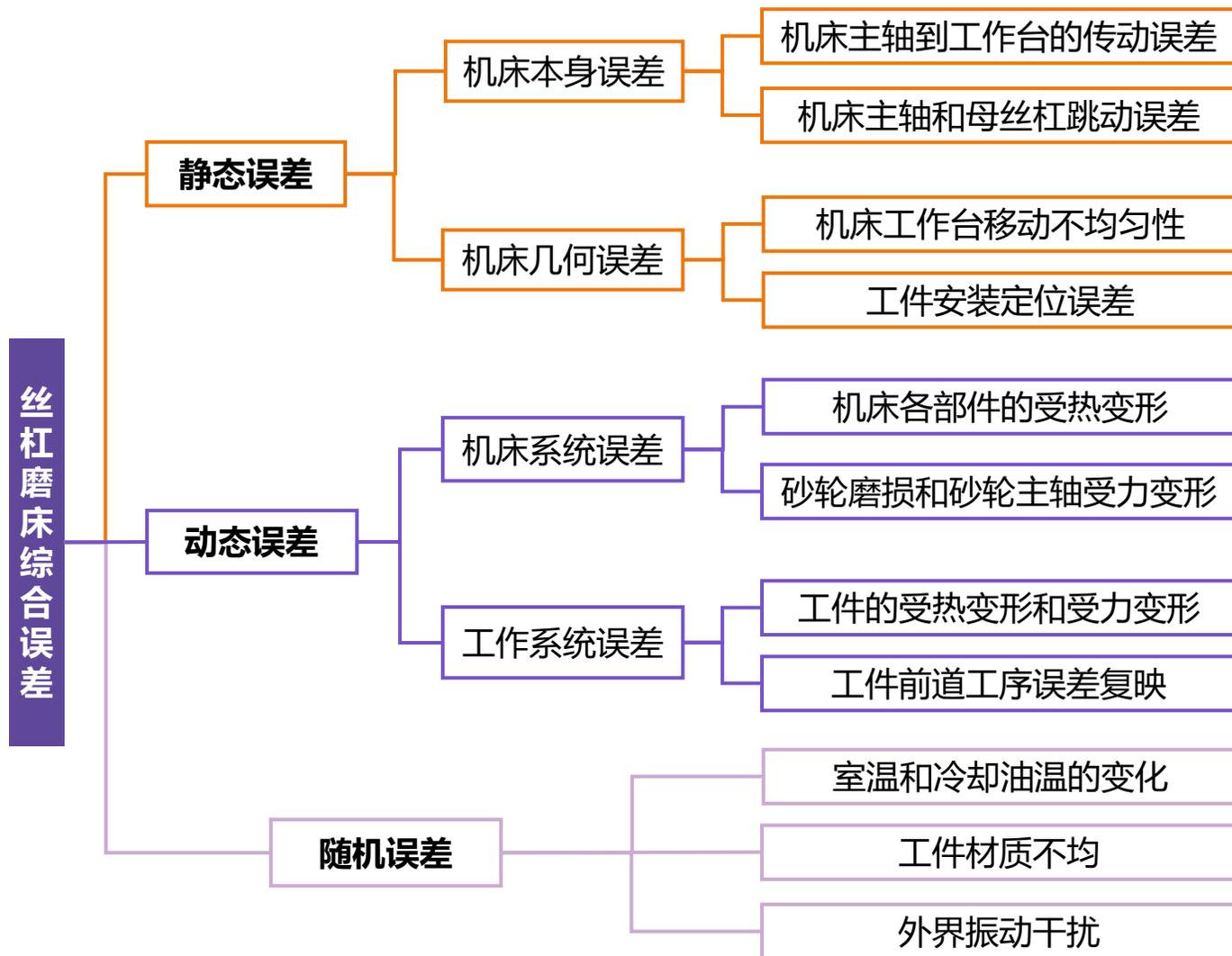
### 2.2.1、磨削精度高，生产效率低

一般来说，磨削精度的提升决定着丝杠的精度提升。我们目前加工滚珠丝杠依然停留在“扎—淬—磨”或者“车—淬—粗磨—精磨”的工艺方法，磨削是丝杠加工的最后道工序。

丝杠磨削精度的因素种类繁多，影响效果也是相互差异。其中各因素所占的比例如下：几何误差为15%—35%，力变形误差占25%—40%，热变形误差占35%—50%，这三种主要因素可占据90%多。

主要产生误差原因总结：

- 1) 丝杠刚度较低，加工过程中弯曲变形，并且容易产生振动，造成螺距误差；
- 2) 工作台伺服电机的齿轮减速机构本身存在制造精度误差、装配精度误差以及使用过程中磨损造成的误差
- 3) 砂轮在磨削过程中的损耗和接触变形的导致控制系统发出的信号并不能完全转化为所要求的理想进给量；
- 4) 砂轮的接触点位置在不断变化，丝杠的温度分布不均，加工过程中80%热量被丝杠吸收产生热变形，对加工精度造成极大的影响。



资料来源：刘鹏飞《滚珠丝杠磨削加工误差预测补偿关键技术研究》，华鑫证券研究

## 2、行星滚柱丝杠精度要求高，加工工艺壁垒深厚

### 2.2.1、螺纹磨床精度已跟上，但核心数控系统仍采用国外产品

欧洲、日本是高端磨床主要产地，对中国采取出口限制措施。2023年4月DMG的每台机床都配备RMS（机床搬迁安保）装置，出售给中国的所有机床都需要增加位置传感器，日本发那科高端五轴数控系统对华禁售。**数控系统是螺纹磨床提高精度的关键，但目前高档数控机床配套的数控系统由发那科、西门子等境外厂商所垄断。**采用国外数控系统前提下，国产磨床加工精度已达P1及以上精度。

- **上海机床厂SK7420型数控丝杠磨床：可磨削P1级甚至更高精度的滚珠丝杠。**适合于磨削三角螺纹、梯形螺纹、锯齿螺纹、圆弧滚珠丝杠以及其他螺纹齿形的外螺纹，可实现P1级精度滚珠丝杠的磨削。统采用西门子 840D控制系统，可控制六轴三联动。
- **汉江机床SK7405数控丝杠磨床：可磨削P2精度丝杠，**采用西门子828D数控系统，实现三轴二联动，配置螺纹自动对刀装置，满足批量加工要求；配置金刚滚轮修整器，实现砂轮自动成型修整。可采用多线或单线磨削技术，实现丝杠高效磨削同时可实现丝杠高精磨削。

#### 上海机床厂SK7420型数控丝杠磨床参数

主要规格：	
最大磨削直径	Ø200 mm
最大磨削长度	2 000 mm
顶尖距	2 200 mm
中心高	150 mm
工件最大重量	250 kg
砂轮规格	Ø500×10、15、24×Ø305 mm
砂轮线速度	35 m/s
工件转速(无级)	0.5~50 r/min
工作台纵向移动速度(Z轴)	0.1~4 000 mm/min
砂轮架横向移动速度(X轴)	0.1~4 000 mm/min

#### 汉江机床SK7405数控丝杠磨床参数

1、最大安装直径	50mm
2、顶尖距	150mm
3、最大可磨直径	50mm
4、最小可磨直径	2mm
5、可磨螺纹最大长度	120mm
6、可磨螺纹的螺距	0.25~12mm
7、可磨螺纹最大导程角	左6° 右6°
8、可磨螺纹的头数	1~45（任意）
9、头架主轴转数	1~80 r/min
10、砂轮最大线速度	50m/s
11、砂轮尺寸	350×10×203mm
12、机床外形尺寸（长X宽X高）	1600mm×1700mm×1900mm
13、机床重量	约2500kg

资料来源：肖建军《高精度滚珠丝杠磨床的设计与开发》，汉江机床官网，华鑫证券研究

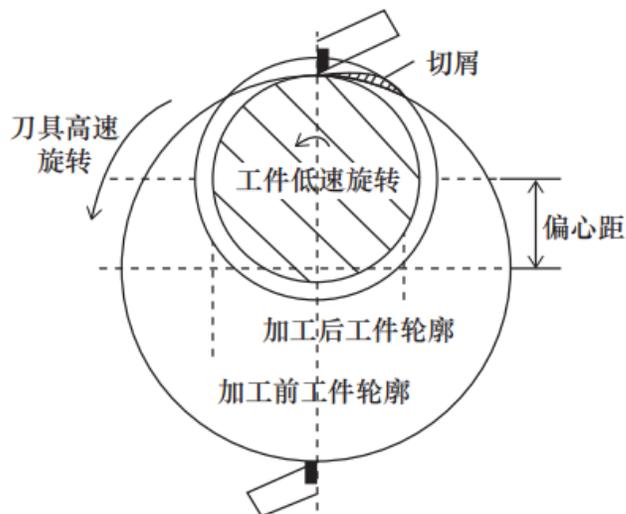
## 2、行星滚柱丝杠精度要求高，加工工艺壁垒深厚

### 2.2.2、旋风铣削生产效率高，国产机床具备较不错的加工能力

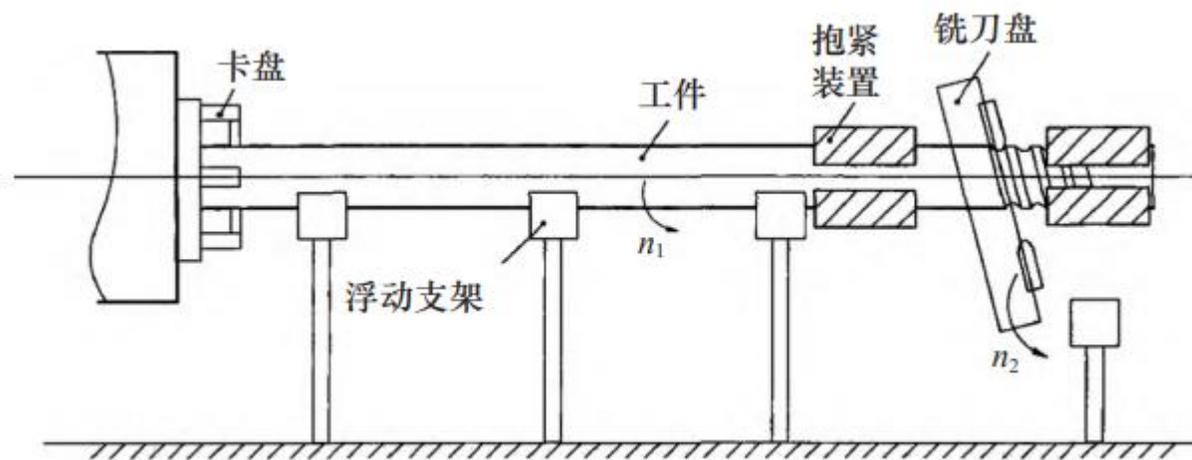
旋风铣削与磨削加工相比，加工效率是其 3~5 倍；与传统切削相比，刀具使用寿命提高了 70%。硬轴承钢 GCr15 工件（硬度为 62~65 HRC）利用刀盘上的多把（6 或 8）均匀对称的高强度成型铣刀，借助于刀盘旋转轴线与工件轴线存在的偏心距  $e$  依次参与切削，且两轴线夹角为螺纹的螺旋角。旋风铣削加工时，刀盘与工件同向旋转完成顺铣；工件以 1~10 r/min 低速旋转，而刀盘以每分钟大于 600 r/min 的转速旋转，工件每旋转一周，刀盘沿着工件轴线移动一个螺纹导程的距离，从而实现整个螺纹滚道的加工。在切削过程中，只有旋转到靠近工件一侧才能参与并完成其切削，这就为远离工件的刀具足够的散热时间在切削液冷却中，旋风硬铣削无需使用切削液实现干切削（压缩空气制冷）。

旋风铣削精度不高的原因在于两点：1) 旋风头的回转轴线与工件轴线有一交角  $P$ ，若采用直线刃刀具就会使螺纹的中心轴向截面牙形轮成为曲线；2) 由于刀刃切削运动轨迹与被加工螺纹空间曲线不一致，而将相交部分切去，这一现象就是过切。如果切削会产生过切现象会将螺纹牙槽切大。

旋风硬铣削加工原理图



旋风铣削工作台



资料来源：旋风硬铣削加工技术及其在精密滚珠丝杠加工中的应用\_宋现春，华鑫证券研究

## 2、行星滚柱丝杠精度要求高，加工工艺壁垒深厚

### 2.2.2、旋风铣削生产效率高，国产机床具备较不错的加工能力

国外旋风铣床生产技术较为成熟，汉江机床和博特精工正奋起直追。世界专业生产CNC旋风铣床的厂家包括：德国Leistritz公司、GWT公司、Burgsmuller公司、奥地利WEING ÄRTNER公司、Linsinger公司等。西方的CNC硬旋铣技术是1987年首次引进到我国，2004年南京工艺装备厂首次购进德国Leistritz公司的PW160型CNC硬旋铣机床，时隔5年后又购进Leistritz公司最新的PW300HP型10mCNC硬旋铣机床。

**德国Leistritz**：该公司的PWM200型CNC内螺纹旋风硬铣机床对淬火60HRC滚珠螺母实施内旋铣，导程精度可达P3级，表面粗糙度值 $R_a < 0.4\mu\text{m}$ ，中径圆柱度0.01mm，齿形精度0.004mm。

**汉江机床**：凭借其在螺纹制造技术方面的优势，用大约两年的时间自主研发成功HJ092型九轴三联动CNC丝杠硬旋铣床（6m、8m），该机床用国产CBN盘铣刀对62HRC的滚珠丝杠硬旋铣后精度可达C5级，表面粗糙度值 $R_a = 0.4 \sim 0.6\mu\text{m}$ 。

**山东博特精工**：博特精工有多年的旋风软铣经验，近年该公司在CX63普通旋铣机床的基础上自行设计制造SXC A6163型数控旋风铣床，加工精度0.032mm/300mm（C7级），表面粗糙度值 $R_a = 3.2\mu\text{m}$ 。

#### 汉江机床HJ092参数

1、规格	$\phi 125 \times 6000\text{mm}$
2、加工直径	$\phi 40 \sim \phi 125$
3、加工长度	2000~6000mm
4、可加工螺纹的螺距	5~40mm
5、可加工螺纹最大螺旋升角	$\pm 20^\circ$
6、可加工螺纹的头数	1~99(任意)
7、旋风铣头拖板快速移动速度	3000mm/min
8、旋风铣头快进退速度	10000mm/min
9、头架主轴转速	0.5~40r/min
10、旋风铣头主轴转速	425~955r/min
11、刀具分度圆	$\phi 60, 90, 135\text{mm}$
12、刀具线速度	180mm/min
13、头架通孔直径	$\phi 105\text{mm}$
12、尾架顶尖孔	5号(莫式)
13、机床外形尺寸(长X宽X高)	10750×2380×2172mm
14、机床重量	22000kg

#### 德国Leistritz LWN 90s



资料来源：秦川机床官网，Leistritz官网，华鑫证券研究

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/696225021112010113>